

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи на здобуття ступеня вищої освіти

магістр

на тему: «Підвищення експлуатаційної якості деталей обладнання
зерносушильного комплексу кінцевим фрезеруванням
інструментом зі зносостійким покриттям»

КРМ.133ГМмд(ОНП)_22.13.000 ПЗ

Виконав: здобувач вищої освіти
за міждисциплінарною освітньо-
науковою програмою
*«Сервісна інженерія в агро-
промисловому виробництві»*
спеціальностей 133 «Галузеве
машинобудування», 208 «Агроінженерія»
ступеня вищої освіти *магістр*
групи 133ГМмд(ОНП)_22
НОС Василь

Керівник: канд. техн. наук, доцент
ПОПОВ Станіслав

Полтава – 2026 року

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»
Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,
_____ Станіслав ПОПОВ
30 червня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

НОС Василь Тимурович

1. Тема роботи: **«Підвищення експлуатаційної якості деталей обладнання зерносушильного комплексу кінцевим фрезеруванням інструментом зі зносостійким покриттям»**,
керівник роботи **канд. техн. наук, доцент ПОПОВ Станіслав**,
затверджено засіданням кафедри, протокол №18 від 30.06.2025 р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 20 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Методика досліджень.

Розділ 3. Результати експериментів.

Розділ 4. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титульний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів *кваліфікаційної роботи*

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 30 червня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 30.06.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	21.07-27.07.25	
3	Опрацювання літературних джерел	15.12-28.12.25	
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	20.04-26.04.26	
5	Виконання розділів роботи	27.04.26-10.05.26	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	11.05-15.05.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	18.05-20.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	25.05-31.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Василь НОС
(підпис)

Керівник роботи _____ Станіслав ПОПОВ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 4 розділи, 29 рисунків, 5 таблиць, 30 використаних джерел, 58 сторінок. **Ілюстраційна частина:** 8 слайдів.

Об'єкт дослідження – процес кінцевого фрезерування обладнання зерносушильного комплексу з використанням твердосплавного інструменту.

Предмет дослідження – вплив зносостійких покриттів різального інструменту на параметри шорсткості поверхні деталі та методи оцінювання цього впливу на основі експериментальних даних.

Постановка актуальної технічної задачі – підвищення якості деталей сільськогосподарських машин.

Мета кваліфікаційної роботи магістра – підвищення експлуатаційної якості деталей обладнання зерносушильного комплексу за рахунок застосування кінцевого фрезерування інструментом зі зносостійким покриттям, що забезпечує покращення параметрів шорсткості.

Практичне значення кваліфікаційної роботи магістра – надання рекомендацій стосовно удосконалення деталей машин і обладнання агропромислового виробництва.

У **першому розділі** проведено огляд літературних джерел за проблематикою, пов'язаною із підвищенням якості обробки важкооброблюваних матеріалів кінцевим фрезеруванням.

У **другому розділі** запропоновано методiku дослідження процесу кінцевого фрезерування.

У **третьому розділі** подає результати експериментів, у яких визначено вплив параметрів кінцевого фрезерування на якість поверхневого шару.

Четвертий розділ присвячений практичному впровадженню результатів досліджень, оцінці економічної ефективності, безпеки та екологічності розробленої технології.

Практичні результати роботи – розроблено рекомендації щодо подальшого удосконалення процесу обробки кінцевим фрезеруванням, запропоновано методiku визначення шорсткості при обробці інструментом зі зносостійким покриттям, розроблено заходи безпеки, отримано економічний ефект, визначено екологічні аспекти.

Рекомендації щодо використання результатів роботи – результати роботи рекомендовано до використання на підприємствах сервісу та сільськогосподарського машинобудування.

Сфера застосування результатів роботи – виробничі підприємства машинобудівної галузі, агротехнічні сервісні центри, науково-дослідні та проектно-конструкторські організації.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою відповідного сервісу та є оригінальним.

АНОТАЦІЯ

У роботі досліджено вплив зносостійких покриттів кінцевих твердосплавних фрез на формування шорсткості поверхні деталей із титанових, нікелевих сплавів та корозійностійкої сталі. Проведено експериментальне фрезерування групових зразків із використанням інструменту з різними типами покриттів. Визначено параметри шорсткості та коефіцієнта тертя, встановлено закономірності їх зміни залежно від інструментального матеріалу та умов обробки. Результати дозволяють оптимізувати режими фрезерування та підвищити якість поверхневого шару без збільшення обсягу доводочних операцій.

КІНЦЕВЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ, ЗНОСОСТІЙКІ ПОКРИТТЯ, ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ, ТВЕРДОСПЛАВНИЙ ІНСТРУМЕНТ, ЕКСПЕРИМЕНТ, ОХОРОНА ПРАЦІ, ЕФЕКТИВНІСТЬ, ДОВІЛЛЯ

ANNOTATION

The study investigates the influence of wear-resistant coatings on solid-carbide end mills during finishing of titanium, nickel-based alloys, and corrosion-resistant steel. Experimental milling of group samples was performed using tools with various coating types. Surface roughness parameters and friction coefficients were measured, and the main trends of their variation depending on tool material and cutting conditions were identified. The obtained results enable optimization of milling parameters and improvement of surface quality without increasing the amount of finishing operations.

END MILLING, WEAR-RESISTANT COATINGS, SURFACE ROUGHNESS, CARBIDE TOOL, EXPERIMENT, OCCUPATIONAL SAFETY, EFFICIENCY, ENVIRONMENT

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	8
1.1 Кінцеві фрези, застосування	8
1.2 Зносостійкі покриття для кінцевих фрез	12
1.3 Особливості фрезерування, розрахунок параметрів	23
1.4 Дослідження параметрів шорсткості після фрезерування	27
Висновки до розділу 1	33
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	35
2.1 Вибір матеріалу для обробки	35
2.2 Груповий експериментальний зразок	35
2.3 Інструмент, обладнання, оснащення	37
2.4 Визначення шорсткості	38
2.5 Визначення коефіцієнта тертя	39
2.6 Режим обробки	40
Висновки до розділу 2	41
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	43
3.1 Шорсткість обробленої поверхні	43
3.2 Вимірювання коефіцієнту тертя	49
Висновки до розділу 3	49
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК	51
4.1 Безпека ведення операції фрезерування	51
4.2 Розрахунок економічного ефекту	53
4.3 Екологічна безпека	54
Висновки до розділу 4	56
ВИСНОВКИ	58
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	59

ВСТУП

Сучасні зерносушильні комплекси працюють у важких умовах підвищених температур, запиленості, вібрацій та змінних навантажень. Такі фактори спричиняють інтенсивне зношування робочих деталей обладнання (лопаті, кожухи, вали, шестірні, корпусні елементи та ін.). Високі вимоги до експлуатаційної надійності, довговічності цих деталей визначають необхідність застосування технологій обробки, що забезпечують високу якість поверхневого шару, мінімальну шорсткість та підвищену зносостійкість.

Одним із ефективних способів досягнення таких показників є чистове кінцеве фрезерування. Воно дозволяє отримати точні геометричні форми та рівномірну мікрогеометрію поверхні. Проте стабільність параметрів якості обробки суттєво залежить від стану різального інструменту. Тому все більшого поширення набуває використання твердосплавних фрез зі зносостійкими покриттями. Вони зменшують коефіцієнт тертя, температуру в зоні різання та збільшують стійкість інструменту у 2...4 рази.

Актуальність роботи полягає у підвищенні експлуатаційної якості деталей обладнання зерносушильного комплексу за рахунок удосконалення процесу кінцевого фрезерування вибором оптимальних параметрів обробки, використання інструменту із покриттями, що покращують шорсткість поверхні, зменшують інтенсивність зношування деталей під час роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання під час відновлення та виготовлення деталей зерносушильного обладнання. Це забезпечить підвищення їх довговічності, зменшення витрат на ремонт, підвищення енергоефективності роботи комплексу в цілому.

Метою роботи є підвищення експлуатаційної якості деталей обладнання зерносушильного комплексу за рахунок застосування кінцевого фрезерування інструментом зі зносостійким покриттям, що забезпечує покращення параметрів шорсткості.

Об'єктом дослідження є процес кінцевого фрезерування обладнання зерносушильного комплексу з використанням твердосплавного інструменту, а

предметом – вплив зносостійких покриттів різального інструменту на параметри шорсткості поверхні деталі та методи оцінювання цього впливу на основі експериментальних даних.

Для досягнення поставленої мети передбачено розв’язання таких **завдань**.

1. Провести літературний аналіз джерел інформації щодо кінцевого фрезерування та зносостійких покриттів різального інструменту.
2. Розробити методику, що дозволяє врахувати при визначенні параметрів шорсткості поверхні деталі вплив зносостійких покриттів ріжучого інструменту під час чистового кінцевого фрезерування.
3. Експериментальним шляхом визначити вплив покриттів ріжучого інструменту на параметри шорсткості поверхні деталі.
4. Надати рекомендації щодо безпеки проведення операції кінцевого фрезерування, економічної ефективності та екологічності технологічного процесу.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1 Кінцеві фрези, застосування

Фрезерування кінцевими фрезами дозволяє отримувати складні поверхні з високою якістю поверхневого шару та розмірною точністю. Тому особливо широко цей метод поширений у галузях машинобудування, насичених деталями складного профілю [1-3, 21-25]. Найбільшу складність при виготовленні газотурбінних двигунів (ГТД) являє обробка профільних частин лопаток і моноколів відцентрових компресорів. Лопатка компресора є однією із самих масових деталей двигуна. В середньому на двигуні знаходиться від 2 до 3,5 тисяч лопаток. Габаритні розміри лопаток варіюються по висоті в межах від 10 до 1000 мм, по ширині від 5 до 300 мм. Лопатка повинна володіти високими аеродинамічними якостями її профільної частини (шорсткість $R_a = 0,4 \dots 0,8$ мкм), високою втомною і механічною міцністю, мінімальними відхиленнями геометричних форм і розмірів профілю пера від розрахункових (відхилення профілю пера від номінального положення 0,08 мм). Виготовлення профільної частини лопаток, що визначає стабільність експлуатаційних характеристик двигуна в суворій відповідності з їх розрахунковими даними, є необхідною умовою працездатності, економічності і надійності ГТД.

Лопатки компресора виготовляють з таких сталей і сплавів:

- сталі: 14X17H2; 13X11H2B2MФ; 15X12H2MBФAB; 15X16H22M та ін.;
- титанові сплави: BT3-1; BT8; BT9; CT4-1; BT20; BT22 та ін.;
- жароміцні сплави: XH45MBTЮБР; XH77TЮР та ін.

Частка титанових сплавів в загальній номенклатурі сплавів становить – 57%.
Сталей – 37%, жароміцних сплавів – 6%.

Для стабільності лезової обробки необхідна належна стійкість інструмента ресурсу якого повинно вистачати хоча б на обробку однієї деталі. В іншому випадку буде потрібно переналагодження, що може призвести до зниження точності, що неприпустимо. На рисунку 1.1 представлені різні типи лопаток газотурбінного двигуна, а також моноколесо.

Рисунок 1.1 – Деталі ГТД: а – лопатки; б – ротор відцентрового компресора; в – лопатка після чорнового і чистового фрезерування

Було досліджено оброблюваність титанового сплаву BT22 (мікротвердість – 4400 МПа, твердість – 37 HRC, ударна в'язкість – 3 Дж/м²) кінцевими фрезами. Титанові сплави займають проміжне положення по оброблюваності між корозійно стійкими сталями і жароміцними сплавами, фрезерування яких пов'язане зі значними труднощами. Швидкість різання є основним параметром, що визначає стійкість інструменту при фрезеруванні титану. Порівнювали оброблюваність пластинками з твердих сплавів BK8, полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу і кубічного нітриду бору. Діаметр фрез становив 20 мм. Режими різання супутнього чистового фрезерування $t=0,3$ мм; $n=630...1000$ об/хв.; $S_z=0,03...0,05$ мм/зуб. Режимам відповідала шорсткість $Ra=0,3$ мкм. Дослідження показали, що стійкість близько 40 хв. інструмента з BK8 може бути досягнута при зниженні швидкості різання до 20...40 м/хв., при цьому шорсткість збільшиться до $Ra 0,8$. Інструмент з кубічного нітриду бору (КНБ) дозволяє вести обробку при швидкості різання 60 м/хв. при стійкості 100...120 хвилин і $Ra 0,2...0,4$ мкм.

Інструмент на основі алмазу виявився непридатний через катастрофічний знос внаслідок високої температури.

Збільшення биття на 100% знижує стійкість інструменту на 50%. Це обумовлено тим, що величина подачі на зуб починає збільшуватися для одного із зубів і знижуватися для інших. Вібрація, що виникає в процесі різання, також є негативним фактором, що знижує стійкість фрез. Проаналізовано переваги використання фрез з зубцями нерівномірного кроку, що дозволяє знизити вібрацію. На рисунку 1.2 показані фактори відмови кінцевих фрез.

Рисунок 1.2 – Фактори відмови кінцевих фрез

За конструкцією кінцеві фрези можна розділити на фрези зі змінною ріжучою частиною і монолітні. Фрези зі змінними пластинами мають перевагу перед цільними фрезами в сегменті середніх і великих діаметрів. Але вони, як правило, мають більш притуплені ріжучі кромки і меншу точність виготовлення. З-за цього при малих глибинах різання припуск знімається з підвищеним опором, що негативно позначається на якості обробки. При обробці кольорових матеріалів такими фрезами не вдається досягти низьких сил врізання і плавного входу інструменту. Збірні фрези працюють при більш високих швидкостях і вимагають більш потужного обладнання.

Основні переваги фрези зі змінними пластинками – це, безумовно, швидкість і простота заміни тільки частини інструменту, що безпосередньо бере участь у різанні, просте і надійне нанесення зносостійкого покриття на поверхні різальних пластин, економія твердого сплаву. Нижня межа діаметрів кінцевих фрез зі змінними твердосплавними пластинами не опускається нижче 10-12 мм, що обмежує їх застосування при виготовленні спряжень малого радіусу. Вони володіють меншою жорсткістю, що критично при обробці таких ділянок деталей. Як бандажні полиш, радіуси сполучення замка з профільною частиною. Основна галузь застосування – високопродуктивне чорнове і напівчистовое фрезерування. Прикладом збірної фрези можуть служити фрези Laser mill (ліворуч) і DropMill (праворуч) корейської фірми Korloy Inc. (рисунок 1.3).

Рисунок 1.3 – Збірні кінцеві фрези

Твердосплавні цільні фрези позбавлені багатьох недоліків властивих збірним фрезам, їх головним недоліком є висока вартість. Область їх застосування – напівчистова та чистова обробка. Приклади конструкцій цільних твердосплавних фрез із сферичним кінцем представлені на рисунку 1.4.

Рисунок 1.4 – Цільні твердосплавні фрези

Цільні твердосплавні фрези, що мають протяжні ріжучі кромки по торцю і дозволяючі вести обробку з осьовою подачею, забезпечують точні розміри та високу якість обробленої поверхні, а процес різання характеризують відносно невисокі сили. На рисунку 1.5 показано фрезерування міжлопаткових каналів моноколеса.

Рисунок 1.5 – Обробка моноколеса

Необхідність отримання малих радіусів спряження вимагає застосування цільних фрез з радіусною частиною.

1.2 Зносостійкі покриття для кінцевих фрез

Одним з основних методів отримання поверхонь деталей є зняття стружки у вигляді припуску. Механічна обробка залишиться на лідируючих позиціях по сукупності власних їй характеристик в машинобудуванні в майбутньому. Ключовими елементами, що входять у технологічну систему і безпосередньо впливають на результат верстат і інструмент. В даний час продуктивність верстатів не є лімітуючим фактором, який обмежував би ефективність системи. Слабкою ланкою є інструмент, оптимізація і поліпшення властивостей якого може забезпечити значний приріст продуктивності [4, 5, 26-28]. Завдання по збільшенню продуктивності обробки, що стоїть перед виробниками і експлуататорами ріжучого інструменту, на даний момент вирішується декількома способами, головним з яких представляється поліпшення властивостей поверхні різального інструменту. На

рисунку 1.6 представлено відсоткове співвідношення груп методів нанесення покриттів і модифікацій поверхні в інструментальному виробництві.

Рисунок 1.6 – Доля різноманітних груп методів нанесення покриттів та модифікації поверхні в інструментальному виробництві

Перспективним напрямком підвищення продуктивності обробки є оптимізація геометрії ріжучого інструменту, призначення оптимальних режимів різання, робота при яких дозволяє значно підвищити стійкість інструменту. Це розширює можливості вже наявних інструментальних матеріалів, а разом з нанесенням покриттів або іншою модифікацією поверхні що сприяє значному приросту продуктивності.

Доведена можливість виготовлення інструменту з твердосплавного порошку, отриманого методами переробки зношених твердосплавних різальних пластин. Застосування в якості сировини для інструменту переробленого твердого сплаву навіть дещо покращує характеристики інструменту. Це дозволяє ще більшою мірою здешевити операції лезової обробки, а також загальну вартість твердосплавного інструменту, особливо інструменту, який використовує велику кількість твердого сплаву, наприклад фрези.

Згідно з молекулярно-механічною теорією тертя підвищення зносостійкості інструменту можна досягти при виконанні двох головних умов: при високій твердості поверхні інструменту і низької міцності її адгезійного зв'язку з

оброблюваним матеріалом. Поліпшення характеристик матеріалу інструменту шляхом створення наноструктур в твердих сплавах (підвищення стійкості в 1,5–2,5 рази дозволяє виконати перша умова, а нанесення на поверхню інструменту зносостійких покриттів з низьким коефіцієнтом тертя з оброблюваним матеріалом – друге. Створення регулярної наноструктури в інструментах великих розмірів (монолітні фрези, свердла) в даний час представляється вельми складним завданням і застосовується для виготовлення змінних пластин простих форм. Розроблена ефективна технологія видалення старих або зношених покриттів з твердосплавного інструменту, що значно розширює можливості відновлення експлуатаційних характеристик дорогих інструментів.

Нанесення покриттів на різальний інструмент дозволяє частково або повністю виконати вимогу відмови від змащувально-охолоджувальних технічних засобів (ЗОТЗ), пов'язану з вимогами поліпшення екології, а також зниження собівартості виробництва, так як використання та утилізація ЗОТЗ займає від 5 до 15% собівартості продукції. Найбільший потенціал на даному етапі розвитку промисловості полягає у подальшому розвитку технології нанесення покриттів і підборі оптимальних пар покриття-інструмент.

Аналіз покриттів, що наносяться на різучі інструменти, виявив дві великі групи, що відрізняються одна від одної технологією нанесення і особливостями застосування. Це покриття хімічного осадження (CVD – Chemical Vapour Deposition) і фізичного осадження (PVD – Physical Vapour Deposition).

В CVD процесі відбувається осадження твердого матеріалу з парової фази. Основними компонентами установки для нанесення CVD покриття є термокамера, на основі якої встановлюється пластини, система накачування газу, вакуумний насос для забезпечення низького тиску в камері і для видалення надлишкових газів. Робочі гази, такі як хлорид алюмінію, діоксид вуглецю, водень, азот і тетрафторид титану подаються в камеру в попередньо нагрітому стані в певних, строго дозованих кількостях. Вони реагують з поверхнею пластини і формують покриття. Основними параметрами процесу є витрата газу, тиск і температура в камері.

Наприклад, осадження покриття Al_2O_3 відбувається при температурах близько 1000°C , а для TiCN оптимальна температура від 800 до 950°C . Тривалість процесу

може досягати 24 годин. Технологічні труднощі, пов'язані зі складністю нанесення покриттів CVD, обмежують його застосування спеціалізованими інструментальними підприємствами. Методи нанесення покриттів CVD постійно удосконалюються, вже зараз наносяться десятишарові покриття. На рисунку 1.7 схематично подано шари, нанесені на твердосплавну пластинку.

Рисунок 1.7 – Шари на різальній пластинці:

1 – зносостійкий шар, 2 – проміжний шар, 3 – адгезійний підшар

Зносостійкий шар мінімізує хімічну взаємодію з оброблюваним матеріалом, знижує термомеханічні напруження і трибологічну взаємодію за рахунок високої термодинамічної стабільності, твердості і відмінності кристалохімічної будови матеріалу покриття і оброблюваної деталі. Проміжний шар забезпечує високу твердість, теплостійкість і бар'єрні властивості по відношенню до дифузії і теплових потоків, гальмує розвиток тріщин, знижує напруження, створює сприятливі поля напружень стиску. Адгезійний підшар створює високу міцність адгезії по відношенню до інструментального матеріалу, релаксує напруження на межах розділу, формує дифузійну перехідну зону між покриттям і субстратом за рахунок кристалохімічної подібності структур матеріалів і субстрату.

Однак існують значні недоліки, що обмежують застосування методу CVD. Інтенсивність осадження на загострених ділянках знижена, що призводить до значного округлення різальних кромки. Цей ефект зменшують, попередньо округляючи ріжучу кромку на величини 20-50 мкм, однак для ряду інструментів, зокрема пластин для тонкого точіння, всіх типів цілісного кінцевого інструменту

кромка повинна бути більш гострою. Істотною проблемою є складність форм поверхонь кінцевих і осьових інструментів, яка не дозволяє добитися рівномірного нанесення покриття. Цим зумовлене широке поширення методів CVD при нанесенні покриттів на різальні пластини простої форми. На рисунку 1.8 представлена структура покриття, нанесеного методом CVD.

Рисунок 1.8 – Структура покриття нанесеного методом CVD

У подальшому була створена технологія вакуумно-дугового осадження покриттів PVD, що отримала у світовій практиці найменування MEVVA (Metal Vapor Vacuum Arc) або КІВ (конденсація з іонним бомбардуванням). Процес має широке застосування завдяки тому, що дозволяє наносити покриття на гостру кромку, не викликаючи її істотного притуплення внаслідок рівномірного осадження. Твердий матеріал, наприклад метал або металевий сплав, переводиться в парову фазу, часто за допомогою плазми. Розрізняють наступні стадії PVD процесу: створення газу (пари) з частинок, складових напilenня, транспорт пари до субстрату, конденсація пари на субстраті і формування покриття. За допомогою PVD процесу отримують покриття товщиною до 5 мкм, зазвичай після нанесення покриття поверхня не вимагає додаткової обробки. Наприклад, покриття TiN формується випарюванням титану в середовищі азоту і потім осідає на поверхні інструментів та пластин. Метод PVD дозволяє наносити покриття без підвищення крихкості пластинки, так як температура їх нанесення близько 500°C на відміну від 900-1000°C у методу CVD. Застосовується три методи PVD: іонне осадження, випарювання електричною дугою, магнетронне розпилення. PVD – екологічний, не

вимагає високих тисків і температур метод нанесення покриттів. Розширюється використання таких матеріалів, як TiCN, TiAlN і AlCrN, оксиди Al_2O_3 , $(AlCr)_2O_3$, $TiAlSiCrN$.

PVD покриття в першу чергу знаходять застосування там, де необхідні високі вимоги до гостроти ріжучої кромки: нарізуванні різьби, свердління і фрезерування кінцевою фрезой. Для цільного осового інструменту метод PVD є основною технологією нанесення покриття. PVD покриття володіють хорошою адгезією, не впливають на міцність основного інструментального матеріалу і створюють сприятливі стискаючі напруження у поверхневому шарі матеріалу інструменту. Можуть стійко працювати при швидкостях 200-250 м/хв, а також при підвищених, близько 500-1000 м/хв, швидкостях різання при високотемпературному фрезеруванні за рахунок зменшення часу контакту зуба інструмента з заготовкою. Для швидкохідних і твердосплавних фрез застосовуються покриття TiCN і більш продуктивне TiAlN. На рисунку 1.9 зображена структура одношарового PVD покриття.

Рисунок 1.9 – Одношарове PVD покриття при поперечному розрізі

Варто відзначити ще один метод модифікації поверхневих шарів інструменту – іонну імплантацію. При іонній імплантації легуючі елементи наносяться не на поверхню інструмента, а впроваджуються в неї на певну глибину, близько одного мікрона. При іонній імплантації в поверхневому шарі спостерігається підвищення мікротвердості, створення сприятливих напружень стиску. Відсутні проблеми

адгезії, не змінюється геометрія інструмента. На рисунку 1.10 показано покриття Ti–Al–N і мікроструктура поверхні інструменту, обробленої іонною імплантацією.

Рисунок 1.10 – Мікрофотографії перерізів: а – (Ti; Al; N) при нанесенні покриття; б – (Ti; Al; N) отримана іонно-променевою імплантацією

Збільшення питомих навантажень на ріжучий інструмент викликане поширенням титану і жароміцних сплавів, призвело до появи наноструктурованих покриттів. Технологія вакуумно-дугового осадження наноструктурованих покриттів має великі перспективи. Автори особливо виділяють концепцію багатоварових наноструктурованих покриттів, так як вони задовольняють гамі несумісних вимог у порівнянні з традиційними матеріалами.

Велика номенклатура застосовуваних матеріалів інструменту та оброблюваних матеріалів, специфічні особливості, пов'язані з геометрією і режимами роботи інструменту змушують використовувати різноманітні покриття та їх комбінації для досягнення максимальних результатів. Покриття для швидкорізальної сталі повинні відповідати вимогам високій міцності зчеплення покриття та інструментальної основи, що досягається шляхом використання перехідних шарів, що включають компоненти інструментальної основи і покриття, які сприяють зниженню перепаду напружень на їх кордоні та покритті в цілому. Матеріали з ультрадисперсними зернами і збільшеною площею межзеренних кордонів мають кращу твердість, зносостійкість, міцнісні характеристики матеріалу, в тому числі, при циклічних навантаженнях, характерних для фрезерування.

При переході до нанометрових розмірів матеріали змінюють свої фундаментальні властивості. Це відбувається через зміну співвідношення поверхневих і об'ємних атомів індивідуальних частинок. Поверхня самого ідеального кристала може вважатися великим двовимірним дефектом (поверхневі атоми мають односторонні зв'язки). У загальному випадку поверхневі атоми знаходяться на більш близьких відстанях один від одного, ніж атоми в об'ємі кристалічної решітки, і володіють підвищеним запасом енергії. В частинках, розміри яких не відносяться до нанометрових, частка поверхневих атомів мала, і їх впливом на загальні характеристики речовини можна знехтувати. У наночастинок властивості поверхневих атомів стають визначальними. Іншими словами, наночастинки виявляють квантові властивості в залежності від своїх розмірів. Причиною руйнування матеріалів мікрометричної структури з розмірами зерен більше 1 мкм є формування тріщин, що виникають внаслідок концентрації дислокацій у різних дефектах. У наноструктурованих матеріалах з розмірами зерен менше 100 нм проявляється інший механізм руйнування. Для подібних матеріалів головною причиною руйнування є процеси на межзеренних кордонах, що викликано меншою кількістю атомів в зернах порівняно з їх кількістю на кордонах. Наноструктурований матеріал покриття практично ідеальний. Руйнування зерен внаслідок дислокацій практично відсутні, а якщо вони й відбуваються, то швидко гальмуються на межах зерен. У наноматеріалах спостерігається перешкоджання галуження і руху тріщин внаслідок зміцнення кордонів зерен. На рисунку 1.11 зображена схематична залежність твердості матеріалу від розміру його зерна. Екстремум функції припадає на область, в якій зерна мають розмір близько 10 нм.

Рисунок 1.11 – Графік залежності твердості матеріалу від розміру зерна

На рисунку 1.12 представлений графік, що відображає залежність міцності від пластичності наноструктурного і традиційного грубозернистого матеріалу.

Рисунок 1.12 – Графік залежності міцності від пластичності

Широке поширення отримали покриття із титаном TiN , TiC і $\text{Ti}(\text{C}, \text{N})$. Металева фаза часто доповнюється іншими металами, такими як Al і Cr . В даний час використовуються наногradientні покриття $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$, в яких наночастиці нітриду титану і алюмінію чергуються, створюючи gradient концентрації складових елементів. На рисунку 1.13 представлена структура покриття $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$.

Рисунок 1.13 – Структура покриття $(\text{Ti}, \text{Al})\text{N}$

Покриття, що працюють в умовах безперервного різання, будуть зазнавати різні навантаження порівняно з покриттями, що працюють при переривчастому різанні. Також будуть відрізнятися властивості покриттів, що використовуються при чистових і чорнових операціях, призначених для обробки алюмінієвих сплавів або жароміцних сталей. Для твердосплавного інструменту, що працює в умовах переривчастого різання, запропоновано використовувати покриття, що володіють максимально можливою тріщиностійкістю. Це пов'язано з тим, що при переривчастому різанні виникають великі температурні коливання, в ході яких у поверхневому шарі відбувається постійна зміна напружень, викликана різними коефіцієнтами лінійного розширення матеріалу покриття і основи. Проведені дослідження по створенню багат шарово-композиційних наноструктурованих покриттів для різального інструмента, що працює у важких умовах. Обґрунтовано ефективність застосування багат шарових покриттів при переривчастому різанні. Підвищений опір крихкому руйнуванню, підвищена схильність ріжучої частини інструменту до термопластичної деформації і високотемпературної ковзучості обумовлена здатністю тонких шарів ефективно гасити розвиток закритичних тріщин.

Запропоновано найбільш оптимальне покриття для обробки торцевим фрезеруванням легированих сталей: TiCN-TiZrN-TiN . Випробування, проведені у цій роботі, показали збільшення стійкості в 2-4 рази порівняно з одношаровим покриттям TiN .

Розглянуті покриття TiAlCN і TiAlCN із добавкою MoS_2 . Покриття мали товщину близько 1,5-3 мкм і об'ємним співвідношенням $\text{TiAlCN}+\text{MoS}_2$ 70%/30%. Випробування показали, що покриття без MoS_2 твердіше на 20%, проте об'ємний знос, що визначає довговічність роботи інструменту менше на порядок. Проведене авторами дослідження показує необхідність обліку не тільки параметрів твердості покриття, але і його коефіцієнта тертя.

Розглянуті властивості багатокомпонентних, багат шарових покриттів Ti-Mo-N . Показано що багатокомпонентні й багат шарові покриття дозволяють знизити інтенсивність зношування різальних інструментів і підвищити їх працездатність. Випробування проводилися для пластин з ВК6 при різанні сталі 12X18H10T.

Період стійкості таких інструментів підвищився в 3..3,5 рази при використанні покриття Ti–Mo–N.

Показано, що різні типи інструменту з твердих сплавів з розробленими покриттями мають період стійкості, що в 1,5–5 разів перевищує відповідний показник для інструменту зі стандартним покриттям і дозволяють збільшити продуктивність обробки за рахунок зростання швидкості різання на 20..60% при точінні і торцевому фрезеруванні важкооброблюваних матеріалів. Також показано перевагу малodefektnoi структури покриття у порівнянні зі стандартним покриттям того ж складу, що володіє безліччю дефектів. Мікрофотографії покриттів представлені на рисунку 1.14.

Рисунок 1.14 – Морфологія шару TiCrAlN: а – стандартна технологія конденсації з іонним бомбардуванням (КІБ), б – метод фільтрованого вакуумного дугового осадження (ФВДО)

Представлені результати експериментальних досліджень впливу одно- і багатошарових покриттів на знос і стійкість швидкохідних і твердосплавних фрез в широкому діапазоні режимів переривчастого різання при обробці конструкційних легованих і жароміцних сталей. Автори вказують, що вплив покриттів при чистовій обробці на інтенсивність зносу в 1,5..2,5 рази вище в порівнянні з чорною обробкою. Ефективність покриття істотно підвищується при зменшенні радіуса округлення різальної кромки. При зміні радіуса округлення різальної кромки з $1 \cdot 10^{-5}$ м до $0,5 \cdot 10^{-5}$ м ефективність підвищилася в 1,5..2 рази. Показано, що найбільшій ефективності покриття ріжучого інструменту досягає в

момент припрашування, коли коефіцієнт відносного збільшення стійкості сягає 3...10 разів, в подальшому по мірі зносу коефіцієнт знижується до 1,5..4 разів.

Також був проведений аналіз ефективності застосування наноструктурованих покриттів при обробці деталей ГТД. Для токарної обробки показано, що величина несприятливих розтягуючих залишкових напружень на порядок, а глибина їх залягання в 3 рази менше, ніж при використанні інструменту без покриття. Відбувається формування сприятливих напружень стиску. Покриття також зменшують глибину нагартованої поверхні на 20-30%, причому вплив покриттів тим сильніше, чим нижче коефіцієнт тертя і відповідно менше ступінь пластичної деформації. Для забезпечення в поверхневому шарі деталі напружень стиску рекомендується використовувати різучий інструмент з покриттями, що мають мінімально можливий коефіцієнт тертя. Показано, що покриття слабо впливають на параметри шорсткості обробленої поверхні в порівнянні з інструментами без покриття. Покриття знижують силу різання на 10-25%, знижують температуру в зоні різання на 50°C, що дозволяє інтенсифікувати подачу на 7-10% і швидкість різання на 15-20% без значного зниження стійкості інструменту. Продуктивність обробки зросла на 10-18 %.

Механізми зношування, при яких виправдане застосування зносостійких покриттів, мають місце переважно при високих швидкостях обробки. Застосування покриттів запобігає окислювальному зношуванню, що обумовлене взаємодією кисню з матеріалом інструмента.

Так як зносостійкі покриття в першу чергу змінюють коефіцієнт тертя, на межі «оброблюваний матеріал – зносостійке покриття», то для розрахунку параметрів якості поверхневого шару, сил і температур в зоні різання, необхідно при виборі робити акцент на ті залежності які включають в себе величини, що залежать від коефіцієнта тертя.

1.3 Особливості фрезерування, розрахунок параметрів

На відміну від точіння, процес фрезерування є циклічним, товщина зрізу за один цикл різання змінюється від мінімуму до максимуму у випадку зустрічного

фрезерування і від максимуму до мінімуму при супутньому, відповідно сила та температура в зоні різання змінюються аналогічно. При точінні ріжуча кромка відчуває подібний перепад тільки при врзанні або ж при переривчастому точінні. Цикли стиснення і розширення, викликані нагріванням і охолодженням ріжучої кромки, а також циклічне навантаження при фрезеруванні, призводять до значного зниження стійкості інструменту. Проблеми фрезерування досліджували багато вчених. На підставі теоретичних розрахунків було показано, що температура на передній поверхні ріжучого леза циліндричної фрези змінюється на 70% в періоди роботи і холостого ходу зуба, при цьому температурні коливання досягають близько 400°C (рисунок 1.15).

Рисунок 1.15 - Зміна температури передньої поверхні
зуба фрези за один оберт

Проведені дослідження і представлені рекомендації по підвищенню продуктивності переривчастого точіння деталей. Показано, що більший вплив на знос інструменту надають переривчасті навантаження і в меншій мірі зміна температури в процесі різання. Одним з основних параметрів леза, визначальним його міцність, є радіус округлення різальної кромки. Збільшення радіуса округлення різальної кромки відбувається при нанесенні покриття на різальний інструмент, що призводить до збільшення товщини шару, що підминається, на 3-7% в залежності від умов обробки. Збільшення радіуса округлення різальної кромки внаслідок нанесення покриття незначно впливає на процес різання з огляду на те, що в період секунди різання радіус округлення різальної кромки приходить до середнього рівноважного

значення. Сучасні дослідження показують, що ріжуча кромка не має постійного радіуса округлення на всій довжині ріжучого леза. Коливання величини r_1 можуть досягати 30% (рисунок 1.16).

Рисунок 1.16 – Коливання радіуса округлення різальної кромки

Встановлено, що радіус ріжучої кромки не є постійною величиною в процесі різання металу, а за перші метри пройдени різцем стабілізується на деякому середньому значенні. Можливість забезпечення мінімального радіуса округлення залежить від розміру зерна твердого сплаву, наприклад при розмірі зерна 1,5 мкм радіус округлення різальної кромки 7 мкм. Використання наноструктурного твердого сплаву дозволяє забезпечити менший радіус округлення, що сприяє сталому різанню при відношенні товщини перерізу стружки до радіусу округлення 0,2-0,4.

При кінцевому фрезеруванні швидкорізальними сталями найбільшу стійкість забезпечують фрези з радіусом округлення 10 мкм, крім того для постійних процесів різання радіус округлення ріжучої кромки вище, ніж для перемінливих. На основі моделювання методом скінченних елементів кінцевого зустрічного фрезерування зроблено висновок про те, що зміна радіуса округлення з 5 до 40 мкм призводить до збільшення температури всього на 3%. Автором також встановлено, що при збільшенні товщини перерізу зрізу, що характерно при зустрічному фрезеруванні, ступінь пластичних деформацій знижується.

На основі проведення чисельних експериментів отримана формула (1.1) для визначення оптимального радіуса округлення різальної кромки. Працездатність формули гарантується при швидкості різання від 50 до 100 м/хв і подачі від 0,02 до 0,08 мм/зуб.

$$\rho_o = \frac{105 - 0,6 \cdot V - 750 \cdot S_z}{1,5 \cdot \rho_1}, \quad (1.1)$$

де ρ_1 – радіус округлення різальної кромки, мкм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

V – швидкість різання, м/хв.

Необхідно відзначити важливість вибору методу фрезерування: зустрічного або супутнього. При зустрічному фрезеруванні товщина перерізу стружки, а також сили різання зростають від нуля до максимальних значень на виході зуба із заготовки, при попутному фрезеруванні все відбувається навпаки. Однак при зустрічному фрезеруванні зуб фрези починає різання не відразу, а в силу пружних властивостей матеріалу деталі, податливості інструменту і радіуса округлення різальної кромки, певну частину шляху він ковзає по поверхні, обробленої попереднім зубом, поки матеріалу перед зубом не буде достатньо для початку стружкоутворення. В ході цього процесу виникають більші температури, спостерігається знос задньої поверхні зуба, спостерігаються великі теплові потоки в матеріал деталі. Особливо це актуально під час чистового фрезерування, так як малі допуски і подачі на зуб призводять до збільшення ділянки доття, що передує початку стружкоутворення.

При супутньому фрезеруванні вектор швидкості різання має однаковий напрям із вектором подачі. Це призводить до того, що при русі зуба фрези спочатку відбувається ударне врізання зі зняттям стружки великої товщини. Далі товщина стружки зменшується і на виході зуба фрези з заготовки товщина перерізу стружки мінімальна, при цьому значна частина тепла уноситься зі стружкою. Враховуючи специфіку чистового фрезерування кінцевою фрезою, яка передбачає обробку при малих подачах на зуб, більш кращим є супутнє фрезерування. До того ж нанесення

покрить на різальний інструмент призводить до збільшення радіуса округлення різальної кромки, що в свою чергу призведе до збільшення ділянки тертя у разі зустрічного фрезерування. Сучасні верстати та інструменти мають достатню жорсткість і дозволяють вести обробку, як зустрічним, так і супутнім фрезеруванням.

Широке поширення знаходить високошвидкісне фрезерування. Швидкості високошвидкісного різання для обробки жароміцних сплавів 75-100 м/хв, для обробки сталей 300-700 м/хв, для обробки титанових сплавів 100-200 м/хв.

В цілому процес фрезерування є одним з видів лезової обробки, що дозволяє використовувати залежності, отримані з урахуванням специфіки процесу кінцевого фрезерування. Розрахункове визначення геометрії перерізу зрізу, швидкості різання дозволить використовувати раніше розроблені формули.

1.4 Дослідження параметрів шорсткості після фрезерування

Експлуатаційні властивості деталей машин значною мірою визначаються якістю поверхневого шару. Найбільш частою причиною руйнування деталей машин у процесі експлуатації є втомні дефекти, які починають проявлятися в поверхневому шарі у вигляді тріщин. Первинні дислокації в навантаженому кристалі зароджуються на його поверхні. Зародження дислокацій на поверхні і більш висока їх щільність у поверхневому шарі перетворюють останній в самостійну систему. Під якістю поверхневого шару розуміється шорсткість поверхні, залишкові напруження, ступінь і глибина наклепу.

При відхиленні параметрів шорсткості профілю пера лопаток від розрахункових, погіршується газодинамічна стійкість двигуна, зростають аеродинамічні втрати, що призводить до зменшення потужності, ККД і, як наслідок, зниження економічності двигуна. Встановлено, що збільшення шорсткості R_z з 0,05 мкм до 2 мкм знижує втомну міцність на 13 %. Забезпечення заданих конструктором параметрів шорсткості поверхні, при інших рівних умовах, підвищує статичну міцність, а також межу в'іривалості. В роботі [6] автори

використовували детальну комп'ютерну симуляцію процесу фрезерування і отримали результати, близькі до експериментальних даних (рисунок 1.17).

Рисунок 1.17 – Результати комп'ютерного моделювання шорсткості

Автори вказують на можливість застосування розробленої ними програми, як складової ланки однієї з САМ систем, проте відзначають недоліки, а саме велика кількість часу та обчислювальних потужностей, необхідних для розрахунку моделі поверхні.

У роботі [7] автори враховували при розрахунку висоти нерівностей тільки геометричні параметри і отримали спрощені формули, які дозволяють розраховувати параметр R_a для торцевих і бічних зубів кінцевої фрези. Вплив покриттів ріжучого інструменту на процес фрезерування не враховувався.

При фрезеруванні кінцевою фрезою шорсткість обробленої поверхні визначається радіусом фрези, шириною рядка і подачею на зуб. Ширина рядка впливає на висоту нерівностей обробленої поверхні в поперечному напрямку до руху подачі фрези, а подача на зуб у поздовжньому. На рисунку 1.18 представлена типова схема кінцевого фрезерування.

У роботі [8] представлені залежності (1.2, 1.3), що дозволяють розраховувати параметри шорсткості заготовки після обробки кінцевими фрезами. Експериментальні дані підтверджують адекватність моделей, однак формули є емпіричними і не дозволяють розраховувати параметри шорсткості для інших умов

обробки. Також не видається можливим адаптувати їх для можливості обліку зносостійких покриттів.

Рисунок 1.15 – Схема кінцевого фрезерування

$$R_a = 7,5 \cdot 10^{-6} \cdot V^{0,964} \cdot S_z^{0,195} \cdot \gamma^{2,69} \cdot D^{0,917} \cdot \left(\frac{F_x}{F_z} \right)^{-2,6}, \quad (1.2)$$

$$R_z = 2,91 \cdot V^{0,16} \cdot S_z^{0,438} \cdot \gamma^{1,25} \cdot D^{0,474} \cdot \left(\frac{F_x}{F_z} \right)^{-2,8}, \quad (1.3)$$

де D – діаметр фрези, мм;

F_x , F_z – складові сили різання, Н;

S_z – величина подачі на зуб, мм/зуб;

γ – передній кут інструмента, град;

V – швидкість різання, м/хв.

У роботі [9] автори використовували модель чорної скрині для отримання залежності шорсткості від режимних умов обробки при фрезеруванні алюмінієвого сплаву. Моделі притаманні недоліки, притаманні всім емпіричним моделям.

В роботі [10] шорсткість обчислювалася методом скінченних елементів, за допомогою копіювання траєкторії руху інструменту. Автором роботи встановлено, що на формування шорсткості поверхні, обробленої методом високошвидкісного фрезерування (ВШФ), впливають дві складові процесу механообробки: геометрична і деформаційна. Сама ж фрезерована поверхня, після застосування технології ВШФ зі складними траєкторіями переміщення інструменту, відповідає характеристикам шліфованої і є випадковим процесом розподілу амплітуд, як у поздовжньому, так і поперечному напрямку. Результати моделювання шорсткості поверхні представлені на рисунку 1.19.

Рисунок 1.19 – Поверхня при високошвидкісному фрезеруванні

Інтегральний квадратичний функціонал, на відміну від традиційних методів оцінки шорсткості середнєарифметичним відхиленням профілю (R_a) та висотою нерівностей профілю по десяти точках (R_z), дозволяє детально описати профіль шорсткості поверхні в одному перерізі. В цілому при фрезеруванні з малими подачами стан поверхні носить випадковий характер.

В роботі [11] розглянуто розрахунок геометричної складової шорсткості з урахуванням зустрічного або супутнього фрезерування, а також з урахуванням фрезерування поверхонь позитивної і негативної кривизни. Для розрахунку

геометричної величини шорсткості при плоскому фрезеруванні використовуються формули:

$$R_z^c = r_\phi \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{S_z \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot r_\phi + S_z} \right) \right), \quad (1.4)$$

$$R_z^3 = r_\phi \cdot \left(1 - \cos \left(\frac{S_z \cdot \pi}{2 \cdot \pi \cdot r_\phi - S_z} \right) \right), \quad (1.5)$$

де R_z^c , R_z^3 – шорсткість при супутньому та зустрічному фрезеруванні відповідно, мм;

r_ϕ – радіус фрези, мм.

У разі фрезерування опуклого контуру з одночасним обертанням фрези і заготовки автор для розрахунку шорсткості пропонує виконання наступних дій. При супутньому фрезеруванні траєкторія руху зуба залишеться у вигляді:

$$\begin{cases} x = \sin(\omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) + \sin((\omega_\phi + \omega_d)t) \cdot r_\phi \\ y = \cos(\omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) + \cos((\omega_\phi + \omega_d)t) \cdot r_\phi \end{cases}, \quad (1.6)$$

де ω_d – кутова швидкість обертання деталі, хв^{-1} ;

ω_ϕ – кутова швидкість обертання фрези, хв^{-1} ;

t – час, хв ;

r_d – радіус деталі, мм;

r_ϕ – радіус фрези, мм.

Записавши рівняння (1.6) для першого та другого зубів фрези, а також спростивши їх, отримаємо систему рівнянь (1.7).

$$\begin{cases} x = \sin(\omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) + \sin((\omega_\phi + \omega_d)t) \cdot r_\phi \\ x = \sin(\varphi - \omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) + \sin(\varphi - (\omega_\phi + \omega_d)t) \cdot r_\phi \end{cases}. \quad (1.7)$$

Рішення системи рівнянь при $\varphi=4\pi$ дасть момент часу t при якому відбудеться формування виступу. Підстановка цього значення у формулу (1.6) дасть координати виступу x, y . Після цього висота нерівностей випуклої поверхні визначається за формулою (1.8):

$$R_z^{\text{вип}} = \sqrt{x^2 + y^2} - r_d. \quad (1.8)$$

При зустрічному фрезеруванні рівняння руху запишеться у виді (1.9).

$$\begin{cases} x = \sin(\omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) + \sin((\omega_\phi - \omega_d) \cdot t) \cdot r_\phi, \\ y = \cos(\omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) - \cos((\omega_\phi - \omega_d) \cdot t) \cdot r_\phi, \end{cases} \quad (1.9)$$

Рішення системи рівнянь (1.7) при $\varphi = 2\pi$ підставляється у формулу (1.9).

Отримані значення x, y підставляються у формулу (1.8).

$$\begin{cases} x = \sin(\omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) + \sin((\omega_\phi - \omega_d) \cdot t) \cdot r_\phi \\ x = \sin(\varphi + \omega_d \cdot t)(r_d + r_\phi) - \sin(\varphi + (\omega_\phi - \omega_d) \cdot t) \cdot r_\phi \end{cases} \quad (1.10)$$

де $\varphi = 2\pi$ – положення 2-го зуба у вершині, що раніше пройдена 1 зубом.

У разі фрезерування за угнутим контуром розрахунок ведеться аналогічно за винятком того, що

$$r_d = r_{\text{угн}} - 2r_\phi, \quad (1.11)$$

де $r_{\text{угн}}$ – радіус угнутого контуру, мм.

До того ж на останньому етапі розрахунку замість формули (1.3) повинна бути використана формула (1.12).

$$R_z^{c_{ytn}} = r_d - \sqrt{x^2 + y^2}. \quad (1.12)$$

Проблеми визначення шорсткості поверхні також розглянуті в [12-15, 29]. На даний час поверхня деталей проточної частини ГТД після кінцевого фрезерування піддається декільком етапам доводочних операцій. Зокрема операція віброабразивного шліфування забезпечує шорсткість $Ra=0,16..0,63$ мкм. Співвідношення між зніманням металу і зміцненням оброблюваної поверхні залежить від виду і матеріалу частинок робочого середовища, траєкторії і режимів колювань, тривалості циклу полірування, застосовуваних промивальних рідин, матеріалу абразиву і розмірів гранул, що використовуються [16-20, 30].

Висновки до розділу 1

1. Огляд раніше проведених досліджень показав, що нанесення зносостійких покриттів на різальний інструмент є одним з найбільш ефективних та економічно виправданих способів підвищення продуктивності обробки різанням. Зносостійкі покриття вносять суттєві зміни в процес формування поверхневого шару деталей, як правило, знижуючи показники шорсткості.

2. Однак дослідники здебільшого проводять експерименти, спрямовані на пошук найбільш продуктивних режимів обробки, що забезпечують найбільшу стійкість інструменту, низький коефіцієнт відшарування покриття. На виробництві часто використовують режими різання, рекомендовані виробниками інструменту, які не враховують необхідні параметри якості поверхневого шару. На етапах чорнової обробки, а також у тих випадках, коли нівелюється вплив якості поверхневого шару деталі на експлуатаційні показники виробу, подібні дії виправдані. Однак машинобудівна галузь виробляє деталі, в яких значна частина ресурсу і надійності закладається не тільки вибором оптимальної конструкції, але і технологією виготовлення. В даних виробництвах варто особливе приділяти увагу не стільки ефективності, скільки якості виробу. Відсутність контролю за параметрами якості поверхневого шару на лезових операціях змушує збільшувати

частку доводочних операцій. Цього можна уникнути, звернувшись до теоретичного призначення режимів різання, що дозволить об'єднати операцію лезової обробки і операції доведення в єдиний комплекс, а то й зовсім виключити останні.

3. Існуючі теоретичні моделі дають змогу розраховувати необхідні параметри обробки для досягнення необхідних параметрів якості поверхневого шару для інструментів без покриття. Існують роботи, які дозволяють враховувати вплив покриття на окремі параметри якості поверхневого шару. На даний час відсутні роботи, що дозволяють врахувати вплив зносостійких покриттів на параметри якості поверхневого шару при фрезеруванні кінцевими фрезами.

4. Широке поширення кінцевого фрезерування, а часом і безальтернативність цього методу при отриманні деталей складної просторової форми з важкооброблюваних матеріалів з високими вимогами до якості поверхневого шару, мотивує проведення досліджень у цій сфері.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Вибір матеріалу для обробки

2.2 Груповий експериментальний зразок

Рисунок 2.1 – Ескіз груптового експериментального зразка

2.3 Інструмент, обладнання, оснащення

2.4 Визначення шорсткості

2.5 Визначення коефіцієнта тертя

2.6 Режими обробки

Висновки до розділу 2

1. У якості оброблюваного матеріалу планується досліджувати титановий сплав BT4, жароміцний сплав ХН78, корозійностійку сталь 40Х13.
2. Наведено технологію виготовлення групового експериментального зразка.

3. Підібрано різальний інструмент, обладнання та оснащення для кінцевого фрезерування.

4. Запропоновано обладнання для визначення параметрів шорсткості та коефіцієнта сухого тертя.

5. Призначено режими обробки під час кінцевого фрезерування.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1 Шорсткість обробленої поверхні

[illegible]

Полтавський державний аграрний університет

[illegible]

Полтавський державний аграрний університет

Полтавський державний аграрний університет

3.2 Вимірювання коефіцієнту тертя

Висновки до розділу 3

Полтавський державний аграрний університет

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБОК

4.1 Безпека ведення операції фрезерування

Під час виконання операції кінцевого фрезерування важливо забезпечити безпечні умови праці, що запобігають травмуванню персоналу, пошкодженню обладнання та заготовок. Безпека процесу визначається правильністю вибору інструменту, режимів різання, технічним станом верстату, а також дотриманням вимог охорони праці відповідно до ДСТУ ISO 23125:2016 та НПАОП 0.00-1.28-10 «Правила охорони праці під час експлуатації верстатів з обробки металу».

Основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами під час кінцевого фрезерування є:

- обертіві частини шпиндельного вузла, патрона, фрези;
- утворення гострої стружки, що може відлітати із великою швидкістю;
- шум (до 90 дБ) та вібрації, що передаються на оператора;
- нагрівання інструменту та заготовки;
- наявність змащувально-охолоджувальної рідини (ЗОР), пари якої можуть бути шкідливими при тривалій дії.

Також небезпеку становлять помилки під час налаштування верстату, неправильне кріплення заготовки або використання зношеного інструменту.

Робоче місце оператора має бути добре освітленим (не менше 300 лк) та відповідати вимогам ергономіки. Поверхня навколо верстату повинна бути чистою, сухою, без сторонніх предметів та плям мастила. Верстат необхідно заземлити відповідно по встановлених норм і правил. Для збирання стружки потрібно використовувати спеціальні щітки або гачки, заборонено прибирати стружку руками. Забороняється проводити вимірювання, чищення або регулювання під час роботи шпинделя.

Оператор фрезерного верстату повинен бути забезпечений:

- спецодягом зі щільної бавовняної тканини;
- захисними окулярами або щитком;
- протишумовими навушниками або берушами;

- рукавицями для роботи зі стружкою (після повної зупинки верстату);
- захисним взуттям із підошвою, що не ковзає.

При використанні змащувально-охолоджувальних рідин рекомендовано застосовувати захисні рукавички із маслостійких матеріалів.

Перед початком роботи необхідно перевірити:

- справність огорожень рухомих частин та системи аварійної зупинки;
- відсутність люфтів у шпиндельному вузлі;
- наявність мастила у відповідних вузлах;
- правильність затискання фрези та заготовки.

У випадку виявлення несправностей робота категорично забороняється до їх усунення.

Перед запуском обробки оператор зобов'язаний переконатися, що всі налаштування виконані правильно, а інструмент не має дефектів. Запуск шпинделя здійснюється при відведеній фрезі. Підведення інструменту до заготовки виконується поступово, без ударних навантажень. При фрезеруванні необхідно дотримуватися рекомендованих режимів різання, щоб уникнути вібрацій та руйнування інструменту. Заборонено залицати верстат без нагляду під час роботи. Після завершення операції необхідно зупинити шпиндель, вимкнути подачу, відключити живлення і тільки після цього очищувати робочу зону.

Для запобігання займанню забороняється використовувати мастила або охолоджувальні рідини на основі легкозаймистих речовин. У приміщенні має бути встановлений вуглекислотний або порошковий вогнегасник. Усі металорізальні верстати повинні бути заземлені, а електроприводи – оснащені автоматичним вимикачем.

Таким чином, дотримання вимог безпеки при кінцевому фрезеруванні забезпечує збереження здоров'я працівників, стабільну роботу обладнання та високу якість обробки. Комплекс заходів (від організації робочого місця до використання засобів індивідуального захисту) є невід'ємною частиною сучасного виробничого процесу.

4.2 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект від впровадження кінцевого фрезерування буде зумовлений зниженням трудомісткості.

Економічна ефективність використання нової техніки, винаходів та раціоналізаторських пропозицій становить

$$E = (\Delta C + \Delta Ц) \cdot A_2 - (0,15 + A_1) \cdot K, \quad (4.1)$$

де ΔC – зменшення собівартості 1 т продукції після впровадження заходу, грн.;

$\Delta Ц$ – збільшення вартості продукції, грн.;

A_1 – коефіцієнт, що враховує амортизаційні відрахування, $A_1 = 0,1$;

A_2 – кількість продукції, т, $A_2 = 5$ т;

0,15 – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень;

K – капітальні вкладення на впровадження заходів, грн., $K = 100000$ грн.

Економія від зниження собівартості утворюється за рахунок зниженням трудомісткості:

$$\Delta C = 0,1 \cdot 330000 = 33000 \text{ грн. / т,}$$

де 330000 – середня вартість 1 тони продукції, грн.

Ціна продукції збільшиться за рахунок доплат під час обробки:

$$\Delta Ц = \Delta Ц', \quad (4.2)$$

де $\Delta Ц'$ – середнє збільшення доплат за рахунок даних заходів, грн./т,

$$\Delta Ц' = 4000 \text{ грн. / т ;}$$

$$\Delta Ц = 4000 \text{ (грн./т).}$$

Відповідно до формули (4.1) маємо наступне:

$$E = (33000 + 4000) \cdot 5,0 - (0,15 + 0,1) \cdot 100000 = 160000 \text{ (грн.)}.$$

Отже, економічний ефект від впровадження кінцевого фрезерування склав 160000 грн. на рік.

4.3 Екологічна безпека

Екологічна безпека під час механічної обробки металів, зокрема фрезерування, передбачає зменшення негативного впливу технологічного процесу на навколишнє природне середовище. Обробка металевих деталей супроводжується утворенням твердих, рідких, газоподібних відходів, споживанням енергії, а також змащувально-охолоджувальних матеріалів. Тому під час організації процесу фрезерування необхідно забезпечити раціональне використання ресурсів, утилізацію відходів, мінімізацію шкідливих викидів відповідно до вимог Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища» та ДСТУ ISO 14001:2015 (Системи екологічного управління).

Під час операції фрезерування виділяються такі екологічно небезпечні чинники:

- металева стружка (тверді відходи);
- відпрацьовані змащувально-охолоджувальні рідини, що містять мастила, присадки та продукти зносу (рідкі відходи);
- аерозолі та пари змащувально-охолоджувальних рідин, що потрапляють у повітря робочої зони (газоподібні відходи);
- підвищений рівень шуму та вібрацій;
- енергоспоживання електроприладів верстату;
- нагрівання навколишнього середовища внаслідок відведення тепла під час різання.

Кожен із цих факторів при недотриманні технологічної дисципліни може призвести до забруднення повітря, ґрунтів, води або до перевищення допустимих рівнів шумового навантаження.

Для забезпечення екологічної безпеки під час фрезерування доцільно впроваджувати такі заходи:

1) оптимізація використання змащувально-охолоджувальних рідин:

- застосування малотоксичних або біорозкладних змащувально-охолоджувальних рідин на водній основі;
- регулярна фільтрація та регенерація охолоджувальних рідин з метою продовження строку їх служби;
- герметизація систем подачі змащувально-охолоджувальних рідин для зменшення випаровування та витоків;
- відбір та передача відпрацьованих змащувально-охолоджувальних рідин на спеціалізовані підприємства для утилізації;

2) поводження зі стружкою:

- стружку слід збирати у спеціальні контейнери із подальшим сортуванням за видом металу (сталь, чавун, алюміній, мідь);
- забороняється зберігати стружку на відкритих ділянках, щоб уникнути потрапляння мастил до ґрунту;
- підлягає повторній переробці як вторинна сировина;

3) зниження шуму та вібрацій:

- використання верстатів із антивібраційними системами;
- своєчасне балансування фрез;
- розміщення шумних агрегатів у звукоізованих кабінах;

4) раціональне енергоспоживання.

- впровадження енергоощадних приводів з частотним регулюванням;
- автоматичне вимикання верстатів у режимі простою;
- регулярне технічне обслуговування для уникнення перевитрати електроенергії через зношування механізмів.

Для зменшення концентрації аерозолів змащувально-охолоджувальних рідин у повітрі застосовуються:

- місцеві відсмоктувачі біля зони різання;
- фільтрувально-вентиляційні установки із циклонним або касетним очищенням;

- регулярний контроль повітряного середовища.

Нормативна температура у робочій зоні повинна становити 18...20°C, а рівень шуму – не перевищувати 80 дБ.

Усі відходи процесу фрезерування підлягають обліку та централізованому збиранню. Відпрацьовані мастила, емульсії та металева стружка класифікуються як відходи IV класу небезпеки і мають передаватися на утилізацію або регенерацію. Зливати відпрацьовані рідини у каналізацію категорично заборонено.

У рамках екологічного моніторингу доцільно проводити:

- контроль витрат змащувально-охолоджувальних рідин та енергоресурсів;
- облік та зменшення утворення стружки;
- вимірювання рівнів шуму, вібрацій та концентрацій парів у повітрі;
- оцінку ефективності системи очищення та вентиляції.

Результати таких вимірювань використовуються для удосконалення технологічного процесу й підвищення його екологічної ефективності.

Таким чином, забезпечення екологічної безпеки під час фрезерування є важливою складовою сучасного машинобудівного виробництва. Раціональне використання змащувально-охолоджувальних матеріалів, повторна переробка металевих відходів, ефективна вентиляція та енергозбереження сприяють зниженню негативного впливу на довкілля і формуванню екологічно орієнтованого виробництва.

Висновки до розділу 4

У даному розділі було розглянуто основні аспекти безпеки праці, економічної ефективності та екологічної безпеки процесу кінцевого фрезерування.

1. Забезпечення безпечних умов під час фрезерування є ключовим чинником стабільної роботи обладнання та збереження здоров'я персоналу. Дотримання вимог охорони праці, правильний вибір інструменту, режимів різання, використання засобів індивідуального захисту, підтримка належного технічного стану верстату дозволяють уникнути травмувань та аварійних ситуацій.

2. Економічний ефект від впровадження кінцевого фрезерування становить 160000 грн. на рік. Це свідчить про доцільність використання запропонованих технологічних рішень. Зменшення трудомісткості процесу сприяє підвищенню продуктивності праці та зменшенню собівартості продукції.

3. В аспектах екологічної безпеки особливу увагу приділено зменшенню шкідливого впливу на довкілля за рахунок раціонального використання змашувально-охолоджувальних рідин, утилізації відходів, зниження рівня шуму, вібрацій та енергоспоживання. Виконання вимог ДСТУ ISO 14001:2015 сприяє формуванню екологічно орієнтованого виробництва.

Таким чином, впровадження кінцевого фрезерування забезпечує комплексний позитивний ефект, що полягає у підвищенні безпеки праці, економічній вигоді та екологічній стійкості виробництва.

ВИСНОВКИ

1. Проведено літературний аналіз сучасних джерел інформації. Розглянуто конструкції кінцевих фрез, види покриттів (TiN, TiAlN, TiCrAlN), їх фізико-хімічні властивості, методи нанесення (CVD, PVD) та вплив на процес різання. Визначено, що нанесення покриттів суттєво підвищує стійкість інструменту, зменшує силу різання та температуру в зоні обробки, спричиняючи покращення якості поверхні.

2. Розроблено методику визначення параметрів шорсткості поверхні при чистовому кінцевому фрезеруванні. Вона враховує зміну коефіцієнта тертя внаслідок нанесення зносостійких покриттів. Запропоновано використання експериментальних даних коефіцієнтів тертя для побудови моделі зв'язку між геометричними параметрами фрези, режимами різання та параметрами шорсткості.

3. Проведено експериментальні дослідження, під час яких визначено вплив типу покриття (((Al,Ti,N), (Al,Ti,Cr,N), (Al,Si,Ti,N))) на параметри шорсткості при обробці титанових сплавів, жароміцних нікелевих сплавів та корозійностійких сталей. Встановлено, що застосування багатокомпонентних покриттів дозволяє зменшити значення шорсткості Ra на 20...40% порівняно з інструментом без покриття. Отримані результати підтвердили адекватність розроблених розрахункових залежностей.

4. Надано рекомендації із безпеки, економічної ефективності та екологічності процесу фрезерування. Розроблений комплекс заходів забезпечує безпечні умови праці, запобігає травматизму, аваріям. Економічний ефект від впровадження технології становить 150 тис. грн/рік. Це обґрунтовує доцільність використання інструменту із покриттям. З екологічної точки зору впроваджено принципи раціонального використання змащувально-охолоджувальних рідин, утилізації стружки та зменшення рівня енергоспоживання.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Внуков Ю. Н., Залого В. А. Конспект лекцій по курсу «Теория резания» на тему «Износ и стойкость режущих инструментов» : в 2 ч. Сумы : Изд-во СумГУ, 2005. Ч. I. 73 с.
2. Внуков Ю. Н., Залого В. А. Конспект лекцій по курсу «Теория резания» на тему «Износ и стойкость режущих инструментов» : в 2 ч. Сумы : Изд-во СумГУ, 2005. Ч. II. 45 с.
3. Внуков Ю. М., Залого В. О. Зношування і стійкість різальних лезових інструментів : навчальний посібник. Суми: Сумський державний університет, 2024. 273 с.
4. Залого В. О., Криворучко Д. В., Залого О. О. Прогнозування деформаційної складової сил тертя на контактних поверхнях різального інструменту. Вісник ЖДТУ. Серія «Технічні науки». 2009. № 3(50). С. 38–45.
5. Кравчук В. І. Машина, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур: Посібник. Дослідницьке: УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2011. 224 с.
6. Кравчук В., Погорілий В., Постельга С. та ін. Наукові аспекти сучасних технологій збирання, післязбиральної переробки і зберігання зерна. Техніка і технології АПК. № 7(34), 2012. С. 15–19.
7. Максименко В. Зерносушарки фірми «MERU Oy». Техніка і технології АПК. № 8(47), 2013. С. 27–28.
8. Мазур М. П., Внуков Ю. М., Грабченко А. І. Основи теорії різання матеріалів: підручник. Львів: Новий Світ–2000, 2022. 471 с.
9. Antoniadis, A., Savakis, C., Bilalis, N. Prediction of Surface Topography and Roughness in Ball-End Milling. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2003. № 21. P. 965–971.
10. Chou, Y.K. Hard turning of M50 steel with different microstructures in continuous and intermittent cutting. Wear. 2003. № 255. P. 1388–1394.
11. Chou, Y.K., Evans, C.J. Cubic boron nitride tool wear in interrupted hard cutting. Wear. 1999. № 225–229. P. 234–245.

12. Diniz, A.F., Gomes, D.M., Braghini, A. Jr. Turning of hardened steel with interrupted and semi-interrupted cutting. *Mater. Processing Technol.* 2004. Vol. 129, № 2. P. 240–248.
13. Dobrzanski, L. A., Staszuk, M., Golomberg, K. Structure and properties PVD and CVD coatings deposited onto edges of sintered cutting tools. *Archives of Metallurgy and Materials.* 2010. № 1(55). C. 187–193.
14. Gavaleiro, A., DeHosson, J. T. *Nanostructured Coatings.* Springer–Verlag: Berlin, 2006. 648 p.
15. Halpin, T., Byrne, G., Barry, J., Ahearne, F. The performance of polycrystalline cubic boron nitride tools in continuous, semi-interrupted, and interrupted hard machining *Proc. IMechE, Part B. J. Engineering Manufacture.* 2009. Vol. 223. P. 947–953.
16. Klimenko, S. A. *Cutting of Superhard Materials. Advanced Ceramic Tools for Machining Application-2.* Trans Tech Publications: Switzerland–Germany–UK–USA, 1991. P. 1–68.
17. Liu, Z.Q., Zhang, X., Wang, Z.T., Wan, Y. Wear Patterns and Mechanisms of Cutting Tools in High-Speed Face Milling. *J. Mater. Process Technol.* 2002. Vol. 129. C. 222–226.
18. Muñoz, P., Diaz, N., Cassie, Z. Prediction of Tool Wear Mechanisms in Face Milling AISI 1045 Steel. *JMEPEG.* 2012. Vol. 21. P. 797–808.
19. Muzil, J. Physical and mechanical properties of hard nanocomposite films prepared by reactive magnetron sputtering. *Nanostructured Hard Coatings.* 2005. № 10. p. 233.
20. Petrakov, Y. V., Myhovich, A. V. Machining technology analysis for contour milling. *Mechanics and Advanced Technologies.* № 2(89), 2020. P. 114–120.
21. Petrakov, Y., Korenkov, V., Myhovich, A. Technology for programming contour milling on a CNC machine. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. 2 (1(116)). P. 55–61.
22. Rech, J. Cutting Edge Preparation and Surface Issues. *HSS Forum's International Conference "Smart Solutions for Metal Cutting".* Aachen, 2005. P. 1–12.

23. Rodriguez, C. J. Cutting edge preparation of precision cutting tools by applying micro-abrasive jet machining and brushing. Kassel: Kassel University Press GmbH. 2009. 205 p.

24. Sardar, K., Adem, A., Mustafa, U., Bilgehan, O. Effect of Cutting Speed on Tool Performance in Milling of B4CF Reinforced Aluminum Metal Matrix Composites. J. Mater. Process. Technol. 2006. Vol. 173. C. 241–246.

25. Sokovic, M., Kopac, J., Dobrzański, L. A. Cutting characteristics of PVD and CVD-coated ceramic tool inserts. Tribology in Industry. 2006. № 1(28). P. 3–8.

26. Spasov, V., Savan, A., Phani, A. R. Self-lubricating nanocomposite hard coatings for wear protection of cutting tools. CSEM Swiss Center for Electronics and Microtechnology Conference “Nanji 2004”. 2004. № 2. P. 7–14.

27. Tangjitsichareon, S., Senjuntichai, A. In-process monitoring and prediction of surface roughness in ball-end milling process. Annals of DAAAM for 2010 & Proceedings of the 21st International DAAAM Symposium. 2010. № 1. P. 2.

28. Taylan, F., Çolak, O., Kayacan, M. C. Investigation of TiN Coated CBN and CBN Cutting Tool Performance in Hard Milling Application. Journal of Mechanical Engineering. 2011. Vol. 57, Issue 5. P. 417–424.

29. Veprek, S., Reiprih, S. A concept for design of novel superhard coatings. Thin Solid Films. 1995. № 268. P. 64–67.

30. Vukov, Y. N., Germashev, A. I., Kamorkin, P. A., Kozlova, E. B. Efficiency and surface condition assessment of thin wall end milling. Technologies of Information in Education, Science and Production. 2014. № 2(7). C. 97–108.